

**Univerzita Karlova v Praze**  
**Přírodovědecká fakulta**  
**Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užitá geofyziky**

Studijní program: Geologie  
Studijní obor: Geotechnologie



**Martin Alexa**

NOVÉ METODY V SEISMICKÉM PRŮZKUMU  
NEW METHODS IN SEISMIC SURVEY

Bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce: Doc. RNDr. Jan Vilhelm CSc.

Praha, 2015



### Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 4.8.2015

... ..

Martin Alexa

## Poděkování

Na tomto místě bych velmi rád poděkoval Doc. RNDr. Janu Vilhelmovi CSc. za jeho pomoc při psaní této práce. Za poskytování studijních materiálů, literatury a v neposlední řadě také za jeho trpělivost.

## Abstrakt

Cílem této práce je seismický průzkum, konkrétněji stručné shrnutí několika vybraných nových metod a technologických modifikací, používaných v seismickém průzkumu ložisek uhlovodíků. Přímo se práce zabývá novými metodami bezdrátového sběru seismických dat, využitím optických kabelů jako snímačů seismického vlnění, technickým vylepšením vibrátorové jednotky technologie Vibroseis a seismickým průzkumem mořského dna včetně technologie VectorSeis Ocean. Krom toho práce v úvodu velmi stručně podává historický a odborný přehled vývoje od seismologie zemětřesení k seismickému průzkumu.

Klíčová slova: Seismologie, seismický průzkum, uhlovodíky

## Abstract

The objective of this thesis is seismic survey, namely brief summary of a few selected new methods and technological modifications used in seismic survey of hydrocarbon deposits. The work focuses on a cable-free land seismic system, using optical fibre as acoustic sensors, technical improvements of vibrating units in Vibroseis technology and ocean bottom seismic while using VectorSeis Ocean technology. In the beginning concise historical outline and technical overview of progress from earthquake seismology to seismic survey is performed.

Keywords: Seismology, seismic survey, hydrocarbons

## OBSAH

1. ÚVOD.....	1
2. SEISMOLOGIE.....	2
2.1. Historie seismologie.....	2
2.2. Seismický průzkum.....	4
2.3. Reflexní seismika.....	5
3. ZDROJE SEISMICKÉ ENERGIE.....	6
3.1. Explosivní zdroje.....	7
3.2. Neexplosivní zdroje.....	8
3.2.1. Vylepšení technologie Vibroseis.....	9
3.3. Zdroje využívané k průzkumu na vodní hladině.....	11
4. REGISTRACE SEISMICKÝCH VLN.....	13
4.1. Snímače signálu.....	13
4.2. Bezdrátová síť geofonů.....	15
4.3. Využití technologie iDAS.....	18
5. SEISMIKA MOŘSKÉHO DNA.....	21
6. DISKUSE A ZHODNOCENÍ.....	24
7. ZÁVĚR.....	25
8. POUŽITÁ LITERATURA.....	26

## 1. ÚVOD

Tato práce se zabývá seismickým průzkumem a je soustředěna na několik vybraných nových metod a technologických modifikací používaných v seismickém průzkumu ložisek uhlovodíků. Úvodní část práce představuje stručný historický a odborný přehled vývoje od seismologie zemětřesení až po seismický průzkum. Podrobněji se zabývá umělými zdroji seismické energie, konkrétně technologií Vibroseis a možnostmi, jak lze zlepšit parametry seismických vibrátorů. Dále jsou rozebírány systémy pro registraci seismických vln. Konkrétně jde o systém bezdrátového sběru seismických dat, o průzkum mořského dna a dále o registraci seismických vln s využitím optických kabelů. V závěru se pokusím shrnout přínos těchto nových technologií.

Ropa, která je dnes nedílnou součástí našich životů, je využívána již od starověku. První písemný důkaz o využití konkrétně asfaltu pochází již ze starého zákona, kde je popisováno použití asfaltu jako voděodolného materiálu a jako pojiva při stavbě budov. Ten se volně vyskytoval v přírodě (Bible: překlad 21. století 2009). Roku 1846 poprvé představil Abraham Gesner, že pomocí destilace lze z ropy získat hořlavou bezbarvou kapalinu, kterou nazval kerosin, u nás také známou jako petrolej. Kerosin byl vhodný jako palivo do olejových lamp, které si do té doby mohly dovolit pouze nejbohatší lidé (Cline, 2007). Jedinou překážkou pro masové využívání kerosinu a dalších ropných produktů bylo dobývání této suroviny. Do roku 1859 se ropa jímala pouze tam, kde přirozeně vyvěrala na povrch. Roku 1859 byla poprvé získána z vrtu v Pensylvánii Edwinem Drakem (Hemberger, 1997). Tímto započala éra dobývání ropy jako suroviny.

Do konce první světové války bylo nalezení ložiska spíše náhodné, protože neexistoval způsob jak ložisko bezpečně identifikovat. Ve 20. letech 20. století se začala využívat geofyzika k získání informací o tom, co leží pod povrchem země. Od té doby se vyvíjely nové a nové metody až došlo koncem 70. let 20. století k zavedení dnes již běžně využívanému tří a čtyř dimenzionálnímu (dále jen 3D a 4D) seismickému průzkumu. Přesto nám 3D seismický průzkum dokáže pouze napovědět, nikoliv ujistit, o existenci ložiska a především jeho finanční návratnosti. Slouží především k preciznímu určení polohy ložiska, která je následně využita při navigaci vrtné soupravy. Jelikož ale jistotu o těžitelnosti ložiska získáme až s pomocí průzkumných a oceňovacích vrtů, procházely metody dalšími úpravami a vylepšeními. V dnešní době nám technologie umožňují sbírání obrovského množství seismických dat a následné modelování pomocí složitých softwarů k tomu určených, nám vytváří důvěryhodnou 3D reprezentaci rezervoáru. Z důvodu vysokých cen vrtání se snažíme stále zpřesňovat výsledky měření a tím vylepšovat nebo nacházet nové metody, jak bezpečně identifikovat uhlovodíky pod zemí (Maugeri, 2006).



## 2. SEISMOLOGIE

Každý den se na Zemi odehraje několik desítek zemětřesení, která lze v jejich blízkosti pocítit a každých pár dní takové, které je schopno ve svém okolí poničit budovy. Každá seismická událost generuje seismické vlny, které cestují skrze planetu. Tyto vlny se šíří jako deformace země, které jsou ale pro vzdálená zemětřesení tak nepatrné, že je sami ani nepocítíme. K tomu je potřeba využít moderní přístroje schopné tyto pohyby zaznamenat kdekoli na zemi. Seismologie je věda zabývající se těmito vlnami a tím, co jsou nám schopné povědět o struktuře Země. Je to hlavní metoda, kterou používají vědci k zjištění geologických vztahů hluboko pod zemí tam, kde je pozorování nemožné. Seismologie pomohla objasnit mnoho záhad týkající se charakteru naší planety. Je také přímo provázána s pochopením fyzikálních procesů, které způsobují zemětřesení, a s hledáním způsobů, jak redukovat destruktivní dopad následků zemětřesení na lidstvo.

Seismologie je založena na pozorování a zaujímá důležitou roli v obecných geofyzikálních metodách a vědách o Zemi. Prezентuje nám teoretické problémy zahrnující analýzu elastických vln v komplexním prostředí, ale také může být jednoduše použita k získávání poznatků v různých odvětvích zájmu. Informace které v seismologii získáváme, mají širokou škálu nejistoty. Některé parametry, jako například průměrná rychlost tlakové vlny (P vlny) šířící se pláštěm, jsou známy s přesností na zlomky procent, kdežto jiné jako například stupeň tlumení seismické energie uvnitř vnitřního jádra, jsou známy pouze velmi přibližně. Díky vylepšení přístrojů a lepší dostupnosti dat dokážeme lépe pochopit teorii seismiky a také poznat strukturu země. Přestože toho již mnoho víme, některé důležité aspekty chování zemětřesení nám zůstávají skryty, a tak například lidstvo stále neumí zemětřesení předvídat.

Do širokého spektra aplikací seismologie patří například zkoumání zemského jádra tisíce kilometrů pod povrchem, nebo také pro nás důležitější mapování struktury zemské kůry a vyhledávání ropy. Dle Shearera (2009) větší část v seismologii použité fyziky není pokročilejší než druhý Newtonův zákon  $F = ma$ . Ale na základě problémů způsobených použitím reálných seismických zdrojů a struktur je potřeba použít složitých matematických modelů k vystihnutí průběhu vlnění. To je možné díky velkému vývoji výpočetní techniky v posledních desetiletích.

### 2.1. Historie seismologie

Historie seismologie je stopovatelná do dob prvního písemného zápisu o projevu zemětřesení nebo vulkanismu a to přibližně 4000 let před naším letopočtem. V té době se projevy zemětřesení přisuzovaly především nadpřirozeným silám. Před 26 stoletími se poprvé objevují zmínky a teorie o

přirozeném původu zemětřesení jak ve své knize zmiňuje Ben-Menahem (1995). Mezi ně lze zařadit například tu o podzemní explozi která vyvrcholí erupcí vulkánu o které pro změnu píše Shearer (2009).

Na počátku 19. století začali Cauchy, Poisson, Stokes, Rayleigh a další pomalu vyvíjet teorii elasticity a popsali hlavní typy vln, které můžeme očekávat v pevných materiálech. To zahrnuje podélné a příčné vlny, které můžeme pojmenovat jako objemové vlny a poté také povrchové vlny, které se šíří podél volného povrchu. Jelikož se podélné vlny pohybují nejrychleji, někdy se jim říká primary neboli P vlny, kdežto pomalejší příčné vlny jsou také nazývány secondary neboli S vlny (Shearer, 2009). Tyto názvy pramení ze slov primární (primary) a sekundární (secondary) (Ben-Menahem, Singh, 1981). Ujaly se díky pořadí v kterém dorazí na měřicí stanici. V průběhu prvních desetiletí devatenáctého století položili Cauchy a Poisson základy moderní teorie elasticity (Lowrie, 2007). V této době byla teorie šíření objemových i povrchových vln o mnoho napřed oproti seismickému pozorování v praxi, jelikož se tyto vlny podařilo na Zemi identifikovat, až mnohem později (Shearer, 2009).

Shearer (2009) ve své knize zmiňuje, že roku 1857, na popud informace o silném zemětřesení poblíž Neapole, se vydal Robert Mallet, Irský inženýr zajímající se o zemětřesení, do této oblasti, aby studoval destrukci způsobenou touto událostí. Jeho práce reprezentovala první významný pokus v observační seismologii a popsala teorii, že zemětřesení generuje vlny šířící se z ohniska zemětřesení. To je dnes pojmenováno hypocentrum. Ale především zjistil, že můžeme hypocentrum vystopovat zpětnou projekcí vln zpátky ke zdroji. Malletova analýza byla bohužel částečně chybná, kvůli předpokladu, že zemětřesení vzniká explozí a že generuje pouze podélné vlny. Přestože jeho teorie nebyla dokonalá, koncept jako takový už svou váhu měl stejně jako jeho doporučení, aby se založily pozorovatelné pro monitorování zemětřesení. Pokoušel se také o experimenty v oblasti měření rychlosti šíření vln za použití umělých zdrojů.

První seismografy byly založené na netlumených kyvadlech. Tyto přístroje neumožňovaly provádět záznam časového průběhu zemětřesení a tak ani nedovolovaly určit počátek zemětřesení, i když někdy byl počátek zemětřesení zaznamenán lidmi. Podle Shearera (2009) první čas měřící seismograf sestavil Filippo Cecchi v Itálii roku 1875. Nicméně stále bylo použito netlumené kyvadlo, tudíž byl přístroj schopen bez zkreslení zaznamenat pouze krátký interval na počátku zemětřesení. O velký pokrok v kvalitě seismografů se zasloužili Britové v Japonsku například použitím horizontálního kyvadla zapisujícího na rotující disk kouřového skla Jamesem Ewingem. První pozorování vzdáleného zemětřesení bylo provedeno v Postupimi roku 1889. Ernst von Rebeur-Paschwitz byl schopen

zaznamenat zemětřesení odehrávající se v Japonsku s modifikovanou verzí Zölnerova horizontálního kyvadla. Tuto událost lze považovat za počátek instrumentální seismologie v celozemském měřítku. Roku 1898 E. Wiechert představil první seismograf s pružinovým tlumením schopný zaznamenávat využitelné měření po celou dobu zemětřesení. Roku 1906 byl navržen ruským šlechticem B.B. Goliceinem první elektrodynamický seismograf. Roku 1935 byl sestrojen přístroj schopný přímo měřit složky deformace zemského povrchu. Navrhl a sestrojil ho Hugo Benioff (Kvasnička, 1997). Všechny v současnosti používané seismografy jsou elektromagnetické, jelikož tyto přístroje mají nespočet výhod oproti ryze mechanickým přístrojům dřívější doby.

Dostupnost seismogramů zaznamenaných v různých vzdálenostech od jednoho zemětřesení vedla k rychlému postupu v prozkoumávání struktury Země a rychlostí seismickým vln v ní. Shearer (2009) ve své knize zmiňuje i další události. Kolem roku 1900 byly identifikovány P, S a povrchové vlny na seismogramu Richardem Oldhamem. Ten o šest let později také odvodil přítomnost Zemského jádra z absence přímých P a S vln na stanicích, které byly za úhlem přibližně 100°. Roku 1909 zase Andrija Mohorovičić objevil studiem zemětřesení s epicentrální vzdáleností kolem 200 km relativně mělkou rychlostní diskontinuitu. Tato diskontinuita je přibližně 35 km hluboko pod kontinenty a 5 km hluboko pod oceánským dnem. Diskontinuita odděluje kůru od pláště a vžila se pro ní mezinárodní zkratka MOHO. Díky velkému množství dat postupně vznikaly tabulky časů příchodu jako funkce vzdáleností od zemětřesení (hodochrony). Roku 1936 bylo objeveno vnitřní tuhé jádro Inge Lehmannovou a o čtyři roky později Harold Jeffreys a K.E. Bullen vydali poslední verzi svých časových tabulek pro obrovské množství seismických fází. JB tabulky jsou dnes stále používány a obsahují časy lišící se pouze o několik sekund od těch současných.

## **2.2. Seismický průzkum**

Na teoretických základech šíření seismických vln v Zemi je založen i seismický průzkum. Představuje využití studia šíření seismických vln pro hledání ložisek a zásob nerostných surovin. Seismický průzkum byl dle Bagainiho et al. (2010) poprvé proveden na počátku dvacátých let dvacátého století. Seismický průzkum má za úkol, stejně jako seismologie, stanovit rychlosti šíření seismických vln v Zemi a s využitím znalosti fyzikálních vlastností hornin interpretovat podpovrchovou geologickou stavbu. Seismický průzkum nepochybně reprezentuje nejdůležitější geofyzikální průzkumnou metodu, alespoň co se počtu uskutečněných průzkumů týče. Děje se tak i díky široké škále jeho aplikací.

V seismickém průzkumu jsou seismické vlny vytvářeny kontrolovaným umělým zdrojem. Některé vlny se vrátí k povrchu po refrakci nebo reflexi na geologických rozhraních v podzemí. Přístroje rozmístěné podél povrchu detekují pohyb země způsobený těmito vlnami a zaznamenávají časy

příchodů v různých vzdálenostech od zdroje. Tyto časy mohou být konvertovány na hloubky a tím jsme schopni nalézt umístění geologických rozhraní v Zemi. Narozdíl od seismologie jsme v seismickém průzkumu schopni dosáhnout hloubek maximálně do prvních desítek kilometrů pod povrchem (Kearey et al., 2002). Těchto hloubek je schopná dosáhnout například korelační metoda lomených vln (Karus, 1957). Nicméně v užití geofyzice nás zajímá především ekonomické hledisko tzn. hledáme suroviny pouze v takových hloubkách, které jsou technologií těžby dosažitelné a surovinu se z ekonomického hlediska vyplatí těžit. V dnešní době to je maximálně několik kilometrů (Sheriff, 2002).

Dalším velkým rozdílem mezi seismologií a seismickým průzkumem je využití umělých zdrojů, například exploze výbušnin, jejichž umístění, čas výbuchu a charakteristiky výbuchu jsou pod přímou kontrolou geofyzika. O detailech a dalších zdrojích píše v kapitole 3. Seismický průzkum také používá specializované měřicí a registrační systémy a tomu odpovídající techniky zpracování dat a interpretace. Ty jsou rozebírány v kapitole 4.

Různé metody seismického průzkumu jsou široce aplikovatelné na problémy zahrnující detekci a mapování geologických hranic. Jsou také schopny identifikovat některé fyzikální vlastnosti jednotlivých geologických vrstev nebo celků. Jsou především vhodné k mapování vrstvených sedimentárních hornin a jsou tudíž velmi používány k vyhledávání ropy a zemního plynu. Metody jsou také v menším měřítku používány pro mapování mělké geologické stavby, například pro řešení otázek možnosti pohybu podzemní vody a průzkumu stavebních parcel zahrnující stanovení hloubky skalního podloží. Seismický průzkum může být použit na souši i mimo ní.

### **2.3. Reflexní seismika**

Seismický reflexní průzkum je v oblasti vyhledávání a těžby uhlovodíků nejvíce používaná a velmi dobře propracovaná geofyzikální metoda. Tato technika je velmi sofistikovaná. Je to výsledek především obrovských celosvětových investic na vývoj od uhlovodíkového průmyslu, děje se tak především z důvodu strategičnosti této suroviny, ale je také svázán s vývojem pokročilé elektroniky a výpočetní techniky. Díky tomu jsme dle Keareyho et al. (2002) schopni zkoumat geologické struktury v měřítkách od prvních desítek metrů pod povrchem až po celou litosféru.

V seismickém reflexním průzkumu jsou obvykle odražené vlny zaznamenávány na povrchu v blízkosti seismického zdroje. Zaznamenáváme časy příchodu odrazů a z nich určíme rozložení rychlostí

v prostředí a průběh odrážejících rozhraní. Průzkum se často odehrává v sedimentárních pánvích. Kearey et al. (2002) uvádí, že těchto případech je rychlost seismických vln často funkcí hloubky a dále se liší podle fyzikálních vlastností individuálních vrstev. Rychlost se také může měnit i horizontálně, díky laterálním litologickým změnám v jednotlivých vrstvách.

Reflexní seismika, na rozdíl od refrakční seismiky, potřebuje velké množství měřících bodů, aby dávala smysluplné výsledky. To vede k relativně vysoké ceně tohoto průzkumu. V National Academy Press (2000) se píše, že výhodou reflexe je i to, že na rozdíl od refrakční seismiky dovede poskytnout správné výsledky i v případě prostředí s rychlostní inverzí. Na vysoké ceně reflexní seismiky se podílí i její vysoká náročnost na výpočetní techniku a zpracování dat.

### **3. ZDROJE SEISMICKÉ ENERGIE**

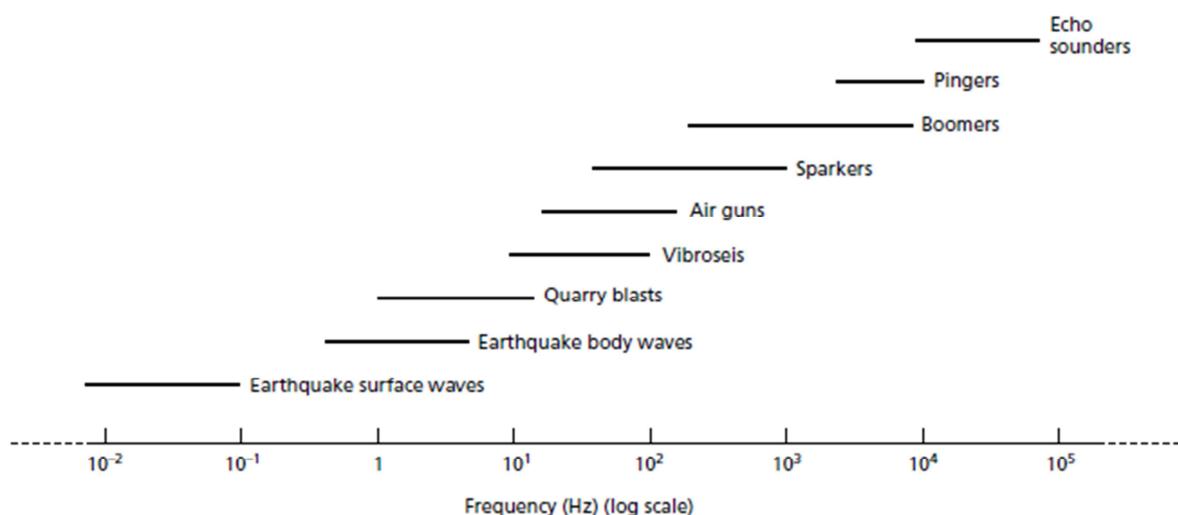
Seismický zdroj představuje lokalizovaný region, ve kterém je náhle uvolněna energie vedoucí k rapidnímu pohybu okolního média. Typický zdroj seismického vzruchu je exploze. Přestože jsou exploze stále velmi využívané, roste počet více sofistikovaných, efektivnějších a bezpečnějších metod jak budit seismické vlny.

Hlavní požadavky na seismické zdroje jsou dle Keareyho et al. (2002):

- Dostatečná energie napříč co nejširším spektrem možných frekvencí prodloužených až k nejvyšším zaznamenaným frekvencím.
- Energie by měla být koncentrována v potřebný typ vln, které pro specifický průzkum potřebujeme, buď P, nebo S vlny. Dále by zdroj měl generovat co nejméně ostatních typů vln, jelikož nechtěný typ energie degraduje zaznamenávaná data koherentním šumem.
- Vlnění vzniklé použitím specifického zdroje musí být opakovatelné, tj. musí mít stále stejné parametry (amplitudu, frekvenční obsah, ..). Seismický průzkum téměř vždy záleží na podobnosti seismogramů vytvořených sérií zdrojů na různých lokacích. Variace v seismogramech by měly značit podzemní strukturu, ne různé variace zdrojů.
- Zdroj musí být bezpečný, efektivní a přijatelný pro životní prostředí. Většina seismických průzkumů jsou komerční operace, které podléhají bezpečnostní a environmentální legislativě. Musí být co nejlevnější. Dodržování bezpečnostních pravidel ale nemusí znamenat nutně zdražení průzkumu. Nehledě na osobní zranění, jsou nehody klasifikovány jako události kdy došlo ke ztrátě času.

Kompletní seismické/akustické frekvenční spektrum různých metod, založených na šíření elastických vln, je zobrazeno na obr. 1. Je zde velmi široké spektrum seismických zdrojů charakterizovaných

různou úrovní energie a různými frekvenčními charakteristikami. Podle Keareyho et al. (2002) se jako seismický zdroj označuje zdroj o frekvenci v intervalu od 1 Hz do prvních stovek Hz. U konkrétního zdroje je energie kmitů často koncentrovaná do užších frekvenčních intervalů. Charakteristiky zdrojů můžou být modifikovány použitím několika podobných zdrojů umístěných za sebou, například pro úpravu spektra transmitovaného pulzu lze použít air guny různých charakteristik a tím kombinovat různé periody pulzů bublin.



Obr. 1. Seismické/akustické spektrum různých zdrojů; na ose x je frekvence v Hz v logaritmickém měřítku (Převzato z Kearey et al., 2002).

### 3.1. Explosivní zdroje

Na zemi jsou výbušniny obvykle odpalovány v mělkých vrtech pro lepší přenos energie a také pro minimalizaci škod na povrchu. Výbušniny představují poměrně levný a velmi efektivní seismický zdroj s širokým spektrem frekvencí, ale pro jejich využití je obvykle požadováno speciální povolení a představují také problém při skladování a dopravě. Jejich použití je pomalé z důvodu nutnosti vyvrtání odpalovacích vrtů. Jejich hlavní nevýhoda spočívá v nepřesnosti při opakování měření. Ta je vyžadována moderními technikami zpracování dat. Při použití výbušnin na moři je jejich hlavním problémem nemožnost provádět odpaly opakovaně v přesných časových intervalech relativně rychle za sebou. To je vyžadováno především pro efektivní reflexní profilování na moři, kde lodě táhnou zdroj za sebou. Z těchto důvodů jsou explozivní zdroje postupně vytlačovány jinými zdroji a použití výbušnin je většinou limitováno na oblasti, kde je nemožné využít alternativní zdroje.

### 3.2. Neexplozivní zdroje

Mezi nejjednodušší zdroje patří úder kladivem a pád závaží. Ty se mohou pohybovat v rozmezí od několik tun vážícího závaží pouštěného z nákladních automobilů po jediného člověka s palicí. Pokud požadavky na energii zdroje jsou poměrně malé, může být úder kladivem na podložku efektivnější a rychlejší, než použití sofistikovanějších zdrojů. Dle Keareyho et al. (2002) lze využít také horizontální úder kladiva nebo závaží do desky částečně vložené do země, ten může být použit pro měření pomocí S vln.

Kearey et al. (2002) ve své knize popisují další poměrně jednoduchý zdroj, používaný především pro průzkumy menších rozměrů, tím je použití kompaktní chemické energie uschované v munici zbraní malých ráží. Lze například vypálit kulku z pušky přímo do země. Přestože je tato metoda velice efektivní jako vysokofrekvenční zdroj, je ve spoustě zemí omezena legislativou. Alternativou je vypálení slepých brokovnicových patron do díry pomocí speciálního zařízení běžně nazývaného jako „buffalo gun“ neboli bizoní puška. Slepá brokovnicová patrona nabízí impulzivní zdroj značně silnější než bouchání palicí, vyžaduje ale přísnější bezpečnostní pravidla.

A nakonec nejvíce využívaným neexplozivním zdrojem pro reflexní seismický průzkum je technologie Vibroseis. Ta byla patentována v roce 1953, ale nebyla příliš využívána ještě mnoho let po jejím představení (Telford et al., 1990). Tato technologie využívá vibrátory namontované na nákladní automobily ke generování dlouho trvajících vibrací malých amplitud s proměnlivou frekvencí známých jako „sweep“ signál. Kearey et al. (2002) uvádějí, že typický signál má délku od několika sekund po první desítky sekund a jeho frekvence se pohybuje mezi limity které jsou přibližně 10 Hz a 80 Hz. Zaznamenané seismogramy musí být pro jejich čitelnost korelovány se signálem sweepu. Vzniklý seismogram po korelaci se nazývá korelogram. Ten je podobný seismogramům získaným při využití explozivního zdroje.

Vibroseis je rychlý a vhodný zdroj jelikož produkuje přesně známý a opakovatelný signál (Kearey et al., 2002). Vibrátorová jednotka (dále jen vibrátor) se skládá z hydraulického vibračního zařízení přidělaného na speciální nákladní automobil. Automobil se po dojetí na místo určení postaví na vibrátor a pomocí hydrauliky a vzdušného tlumení začne celou svou vahou předávat vibrace do země (Fair, Miller, 1973). Kearey et al. (2002) uvádějí, že vibrátor potřebuje pevný podklad na kterém by mohl operovat, například asfaltovou cestu nebo konsolidovanou zeminu, protože na měkkém povrchu nelze zaručit generaci požadovaného zdroje seismického vlnění. Největší síla jakou je vibrátor schopen vyvinout je pouze kolem 10 000 N. Proto pro navýšení předávané energie pro hlubší průzkum

jsou obvykle používány skupiny vibrátorů. Běžně je provedeno několik sweepů a naměřené hodnoty z těchto sweepů se sčítají pro zlepšení poměru signálu k šumu.

Jedna z výhod seismických vibrátorů je, že na rozdíl od výbušnin mohou být použity ve městech, jelikož při správném použití nezpůsobují žádnou škodu ani nejsou nebezpečné pro životní prostředí. Kearey et al. (2002) ve své knize také píše, že díky korelaci signálu je tato metoda schopna odfiltrovat velkou část seismického šumu který má původ v obydlených zónách. Některé vibrátory jsou upraveny tak, že mohou vibrovat horizontálně. V tomto případě je lze využít jako zdroj S vln.

Hlavní nevýhoda metody Vibroseis je ve vysoké ceně vibrátorů. Každý vibrátor stojí dle Keareyho et al. (2002) přibližně 500 000 amerických dolarů. Především z tohoto důvodu se metoda využívá především pro hledání uhlovodíků. Pro malé a mělké průzkumy se může využít malých elektromechanických vibrátorů k tomu určených.

### **3.2.1. Vylepšení technologie Vibroseis**

Kvalita výsledného seismogramu pořízeného metodou Vibroseis závisí na šířce frekvenčního rozpětí použitého signálu sweep. Navýšená šířka pásma frekvencí, a to jak v oblasti nízkých, tak i vysokých frekvencí, může pomoci zvýšit rozlišovací schopnost dat, přispět k přesnější charakteristice rezervoáru a rozšířit možnosti kvantitativní seismické interpretace. V této kapitole budu popisovat především výzkum provedený dvojicí Zhouhong a Yuanzhou (2015).

Pro vibrátor je velice obtížné produkovat při nízkých frekvencích dostatečnou energii a zároveň dodržet požadovanou frekvenci. Při vysokých frekvencích nízká tuhost vibrátorové desky brání využití vyšších frekvencí. Při vysokých frekvencích je část energie ztracena při ohýbání vibrátorové desky, a tak je energie vysokofrekvenčních složek nedostatečná pro průzkum do větší hloubky. Tak se ukazuje, že při reflexním seismickém průzkumu za pomoci technologie Vibroseis je vhodné zlepšit výkon vibrátorů tak, aby mohly produkovat dostatečnou sílu s dobrým poměrem signálu ku šumu a širokým spektrem frekvencí.

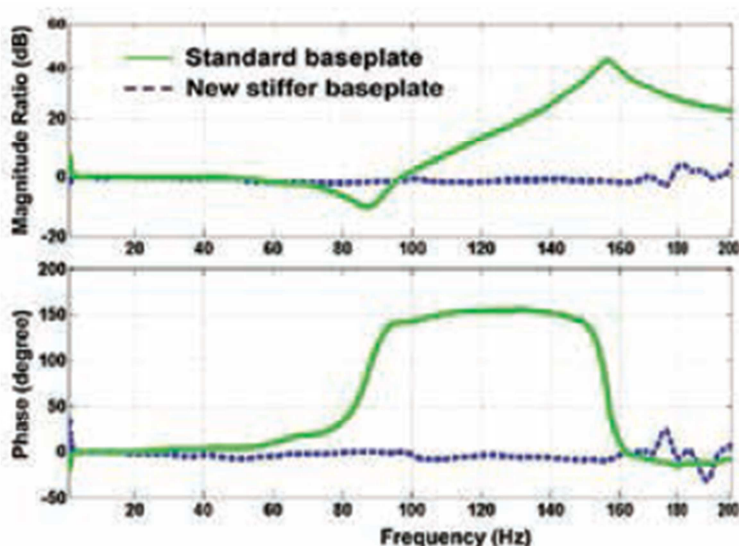
Při průzkumu pomocí technologie Vibroseis se často snažíme, aby vibrátor produkoval sweep tvaru sinusoidy. Řídící elektronika vibrátoru se snaží regulovat vibrátor tak, aby časový průběh síly působící na zem byl co nejvíce podobný sinusoidálnímu sweepu. Sinusoidální sweep lze jednoduše vyjádřit pomocí této rovnice:  $F_g = A \times \sin(\varphi(f, t))$ , kde  $F_g$  je výsledná síla působící na zem,  $A$  je amplituda této síly,  $t$  je doba sweepu,  $f$  je frekvence a  $\varphi$  je fáze. Tato rovnice nám představuje dva způsoby, které



by mohly vést k navýšení energie předávané do země. Jeden z nich je navýšení amplitudy energie předané do země. Toho lze dosáhnout vylepšením hydraulického systému vibrátoru a vylepšením tuhosti vibrátorové desky. Takto by vibrátor byl schopen pracovat efektivněji (Hall, 2009). Druhou variantou je metoda potlačení harmonického zkreslení, tím pádem navýšení amplitudy (Wei, Phillips, 2012).

Pro tyto účely byl navržen nový model vibrátoru AHV-IV 364 (dále jen modifikovaný vibrátor). Tento vibrátor je vybaven novým hydraulickým systémem s lepší reakční vlastností používaného média a také novou deskou vibrátoru. Hydraulický systém má minimalizované překážky pro proudění tlakové kapaliny a dále se snaží navýšit dodávku natlakované kapaliny během momentů jejího největšího průtoku, aby mohla být vytvořena větší hydraulická síla. Nová deska vibrátoru je přibližně  $2,5 \times$  tužší než běžně používaná. Tužší deska pomáhá při předávání energie soustředit více ve vertikálním směru tak, aby hydraulická síla byla maximálně orientována do země. Tyto změny, které popisuje Hall (2009), vedly k měřitelným zlepšením v kvalitě signálu napříč celým spektrem frekvencí a překonaly i omezení u nízkých i vysokých frekvencí oproti běžným vibrátorům.

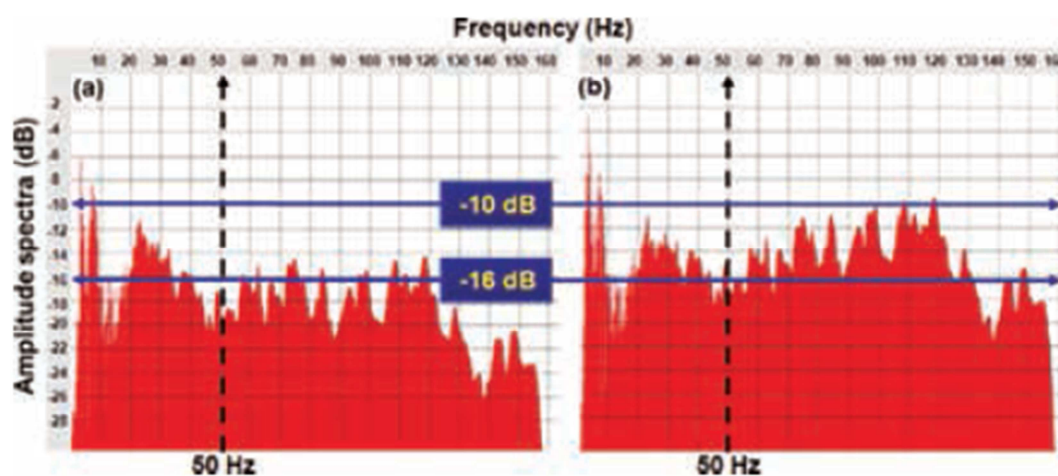
Na obr. 2 je vidět porovnání standardní a nové základové desky vibrátoru. Díky modifikaci systému bylo možné odstranit vysokou turbulenci v hydraulickém systému a tím celkově zlepšit vlastnosti vibrátoru. Jak je z obrázku patrné, nová tužší deska vibrátoru má téměř nulovou odezvu pro frekvenci až 160 Hz, zatímco klasická deska je přesná do frekvence přibližně 40 Hz. To má za následek přesnější odhad vážené sumy síly působící na zem.



Obr. 2. Porovnání frekvenční odezvy vážené sumy síly působící na zem a vlastní síly vibrační jednotky při frekvencích od 1 Hz do 201 Hz. Na ose x je frekvence v Hz. V prvním případě je na ose y amplituda spektra v dB a ve druhém případě fáze ve stupních. Zelená čára představuje spektrum pro

běžně využívanou vibrátorovou desku a modrá čárkovaná čára novou tužší desku. (Převzato z Zhouhong, Yuanzhou, 2015).

Na obr. 3 pro změnu vidíme výkon modifikovaného vibrátoru (vpravo) oproti běžnému (vlevo) při vysokých frekvencích. Modré přímky jsou přidány pro vyznačení rozdílu ve výkonu těchto vibrátorů. Z obrázku vidíme relativně stálý přírůstek ve vysokofrekvenční energii začínající přibližně na 50 Hz. Je zde asi 5 dB zlepšení při frekvenci asi 155 Hz. Přesto je i zde vidět propad v obou spektrech přibližně nad 130 Hz.

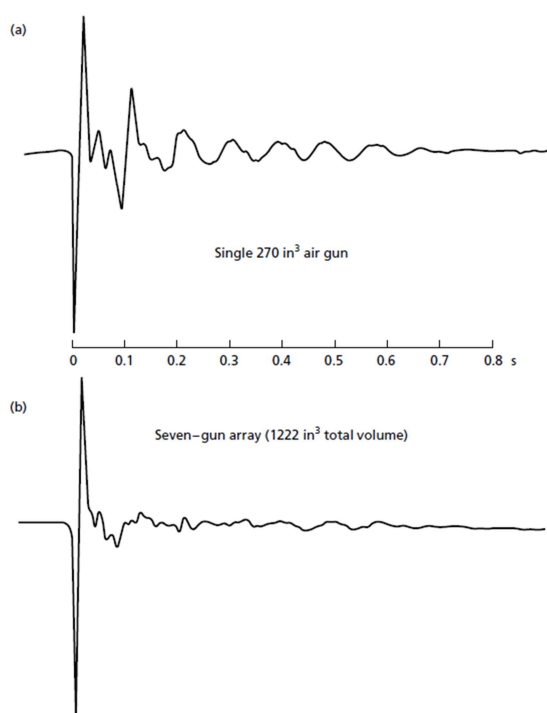


Obr. 3. Amplituda spektra korelovaných dat z geofonu umístěného v hloubce 305 m pod zemským povrchem za použití sweepu od 2 Hz do 160 Hz trvajícího 20 s. Na levé části jsou data zaznamenaná při použití standardního vibrátoru, na pravé při použití modifikovaného vibrátoru. Na ose x frekvence v Hz a na ose y je amplituda spektra v dB. (Převzato z Zhouhong, Yuanzhou, 2015).

### 3.3. Zdroje využívané k průzkumu na vodní hladině

Nejvyužívanějším seismickým zdrojem na vodní hladině jsou tzv. air guny. Jsou to pneumatické zdroje ve kterých je komora zaplněna stlačeným vzduchem. K dispozici je široká škála objemů komor díky kterým jsme schopni generování seismických vln různých frekvenčních charakteristik. Tlak vzduchu je podle Keayreyho et al. (2002) obvykle v rozmezí 10 až 15 Mpa a bývá veden hadicí nebo potrubím z kompresoru umístěného na palubě lodi. Natlakovaný vzduch je poté vypuštěn, pomocí elektronického spínače, skrz ventily do vody ve formě bubliny s vysokým tlakem. Primární pulz generovaný air gunem je následován sérií pulzů bubliny, která se zvětšuje a zmenšuje a navíc se pohybuje směrem k hladině. Tento efekt má na svědomí umělé prodlužování délky signálu. Existují metody jak potlačit efekt pulzujících bublin, například detonací blízko hladiny vody tak, aby plyn mohl uniknout do vzduchu. Přestože jsme schopni tímto odstranit efekt pulzující bubliny, je mnoho

energie ztraceno a seismický pulz směřující ke dnu je oslabený. Díky tomu byly vyvinuty další metody, které se snaží překonat problém pulzujících bublin při zachování seismické efektivity. Nejvyužívanější metodou je použití skupiny air gunů různých velikostí a tudíž i různých period pulzů bublin. Tím vznikne zdroj o velké energii kde se pulzy bublin navzájem částečně vyruší jak je vidět na obr. 4 (Kearey et al., 2002). Pro průzkum s velkým hloubkovým dosahem lze využít několika řad air gunů najednou. Ty bývají většinou přichyceny na rám, který za sebou táhne loď. Air guny jsou mechanicky jednoduché přístroje, tudíž velmi spolehlivé se snadnou opakovatelností měření. Air guny jsou běžné nástroje při průzkumu na vodní hladině.



Obr. 4. Porovnání seismických vln produkovaných (a) jediným air gunem s maximálním tlakem 4,6 barů a (b) řadou sedmi air gunů s maximálním tlakem 19,9 barů. Na ose x je čas v sekundách. (Převzato z Kearey et al., 2002).

Další možnost potlačení pulzování bublin popisují Keyrey et al. (2002) a tou je použití tzv. water gunů. Jedná se o zařízení podobné air gunu, ale natlakovaný vzduch je zde využit pro pohyb pístu který vytlačí vodní proud do okolní vody. Když se píst zastaví, vznikne za proudem vakuová dutina, která následně imploduje na základě hydrostatického tlaku. Jelikož imploze představuje kolaps do vakua, žádný plynný materiál není stlačen, tudíž nemůže pulzovat zpátky. Tímto vznikne silný seismický pulz bez následného pulzování bubliny. Výsledný krátký pulz je potenciálně vhodný pro průzkum s vyšším rozlišením, než při použití air gunů, ale za cenu komplexnější seismické vlny vzniklé pohybem pístu.

Mezi další, méně používané, zdroje patří například využití výbušné směsi plynů. Tato metoda ale nedosáhla takové bezpečnosti ani spolehlivosti jako air guny. Kearey et al. (2002) ve své publikaci popisují proces kdy se ve speciálním zařízení pomocí trubice nashromáždí propan a kyslík, které jsou následně zapáleny zapalovací svíčkou. Produkty následné exploze způsobí roztáhnutí částí tohoto zařízení směrem od sebe a tím generují seismickou vlnu do okolí. Odpadní plyny poté uniknou ventilem na povrch a tím vzniká již známý efekt pulzovací bubliny.

Za zmínku také stojí metoda Marine Vibroseis. Ta zatím není v praxi běžně používaná, ale proběhly testy o kterých se zmiňují Beaten et al. (1988), kdy za pomoci speciální vibrátorové desky připevněné k průzkumné lodi vznikaly seismické vlny.

## **4. REGISTRACE SEISMICKÝCH VLN**

### **4.1. Snímače signálu**

Ke konverzi pohybu země na elektrický signál je zapotřebí snímače signálu, který je citlivý na některé komponenty pohybu země a dokáže přijímat v požadovaných intervalech frekvencí a amplitud bez zkreslení. V této kapitole popisují základní přístroje a techniky snímání na základě publikace Kearey et al. (2002)

První problém nastává při rozhodování, které komponenty pohybu země zaznamenávat. Pohyb částic země je samozřejmě třírozměrný, a aby mohl být věrohodně zaznamenán, je potřeba znát komponenty pohybu ve třech směrech, například ve vertikálním, východo-západním a severo-jížním směru. Poměrně často se měří pouze vertikální složka tohoto pohybu. Zaznamenávání pouze jedné komponenty minimalizuje technickou náročnost a objem ukládaných dat.

Zařízení používaná k detekování seismického pohybu země se označují jako seismometry. Jako geofony se obvykle označují snímače založené na principu elektromagnetické indukce, a ty měří rychlost pohybu částic prostředí. Ve vodě je průchod P vlny detekován pomocí změny tlaku, tj. jde o měření založené na registraci zrychlení pohybu částic prostředí. Tyto snímače se označují jako hydrofony. Ty mohou být použity buď v blízkosti hladiny vody, nebo na dně mělkých vod. Hydrofony také mohou být použity při průzkumu ve vodou saturovaných zeminách jako jsou bažiny a rašiliště. Detektory se mohou skládat z jednotlivých geofonů a hydrofonů, nebo z řad těchto zařízení propojených sériově nebo paralelně k poskytnutí kvalitnějšího výstupu.

Jak země osciluje, je možné měřit posunutí, rychlost nebo zrychlení částic země při průchodu vlny. Technicky je obvykle snadnější určit rychlost pohybu částic prostředí, než velikost posunutí nebo akceleraci, protože k záznamu rychlosti lze využít elektrodynamické měniče, geofony. Geofony jsou vyráběny v různých provedeních, ale nejčastěji je používán geofon s pohyblivou cívkou neboli elektrodynamický (indukční) geofon. Válcová cívka je suspendována pomocí pružinové podpory v poli permanentního magnetu, který je přidělán ke konstrukci geofonu. Suspendovaná cívka představuje oscilační systém s rezonanční frekvencí určenou hmotou cívky a tuhostí pružiny. Geofon je na tvrdém povrchu pevně připevněn, na měkkém povrchu se využívá trnů k zabodnutí geofonu do země. Geofon se pohybuje stejně se zemským povrchem v průběhu vlnění, tím způsobuje relativní pohyb mezi suspendovanou cívkou a fixovaným magnetem. Pohyb cívky v magnetickém poli generuje napětí mezi konci cívky. Oscilační pohyb cívky je tlumen paralelně zapojeným tlumícím odporem. Elektrický proud, procházející přes tento odpor a proudící v cívce, totiž indukuje magnetické pole reagující s magnetem působením silou opačnou k pohybu. Velikost tlumení závisí na velikosti odporu použitého tlumícího odporu.

Ideálně je výstup z geofonů co nejvíce podobný skutečnému pohybu země, toho je dosaženo pečlivým výběrem velikosti tlumení. Malé tlumení způsobí oscilující výstup (oscilace na rezonanční frekvenci geofonu) a příliš velké tlumení zase sníží citlivost geofonu. Podle rezonanční frekvence se používají různé typy geofonů pro různé měření. Nejvíce komerčních seismických reflexních průzkumů využívá geofony s vlastní frekvencí mezi 4 Hz a 15 Hz.

Tento typ geofonů je schopný zaznamenat seismické vlnění pouze ve směru pohybu cívky. Pro měření P vln se používají geofony s vertikálně orientovanou cívkou a pro měření například horizontálně polarizovaných S vln se používají geofony s horizontálně orientovanou cívkou.

Pro měření na vodní hladině se využívají hydrofony. Princip hydrofonů je založen na keramických piezoelektrických prvcích které produkují výstupní napětí přímo úměrné změnám tlaku při průchodu P vlny vodou. Pro vícekanálové seismické měření na moři je využito velké množství hydrofonů umístěných v tzv. streameru. Streamer je plastová trubice vyplněná kapalinou (většinou olejem), která obsahuje velké množství individuálních hydrofonů. Je navržena tak aby na ní působila nulová vztahová síla a na její výrobu jsou použity materiály s podobnými vlastnostmi při průchodu seismické vlny, jako má voda. Tím se zaručí nezkrácený pohyb seismického vlnění až k hydrofonu. Jelikož jsou hydrofony citlivé také na akceleraci, jsou často tvořeny ze dvou částí připevněných k sobě zadní stranou v sérii. Tím se vyruší záznam pohybu ve výstupu.

Řady geofonů, nebo hydrofonů, mohou být zapojeny společně do lineárního, nebo plošného, zapojení čítající desítky až stovky jednotlivých snímačů jejichž výstupy jsou sčítány. Tyto typy zapojení vykazují směrovou charakteristiku, díky které jsme schopni potlačit některé typy rušení.

#### **4.2. Bezdrátová síť geofonů**

Při realizaci seismických měření je jednou z nejpracnějších částí měření instalace geofonů v terénu a jejich vzájemné propojení s registrační aparaturou. Proto je již delší dobu hledáno řešení, jak propojit geofony pomocí bezdrátové komunikační sítě. V následující části je na základě článku Crice (2014) pojednáno o realizaci bezdrátového systému registrace, využívajícího 7500 kanálů a registrující v reálném čase.

Distribuované seismické systémy založené na používání kabelů jsou dnes běžnou praxí. V průběhu let s vyvíjejícím se obchodem a technologiemi zůstalo pouze několik málo výrobců těchto systémů. Probíhající vývoj se zaměřuje především na množství kanálů a senzorů. V tom smyslu, že jsme schopni stále zahušťovat síť geofonů i zároveň měřit na větší ploše. Až budeme schopni používat milion senzorů, výrobci budou připraveni.

Bezdrátová seismika je mnohem mladší technologie s výběrem zpracování od několika výrobců. O tomto konceptu se hovoří již dlouho. Dokonce bylo provedeno několik pokusů k vytvoření použitelného bezdrátového systému, ale s každým požadavkem pro více kanálů byl tento úkol stále obtížnější. Nyní s probíhajícím boomem elektroniky a výpočetní techniky, který poznamenal naše soukromé i profesionální životy, se to stává možným. Obrovské množství výkonných a levných mikroprocesorů s velkou pamětí, vysílacích čipů z Wi-Fi systémů, které jsou schopné pracovat v nelicencovaných (neplacených) frekvencích, lithiových baterií, analogově digitálních převodníků a robotizovaných výrobních linek, které jsou běžně používány, umožňuje výstavbu bezdrátového seismického systému za přibližně stejnou cenu jako kabelového s velkým počtem kanálů.

Při používání kabelů se potýkáme s mnoha problémy. Největší problém představuje logistika. Při nejkromnějším 3D průzkumu je potřeba natáhnout 150 a více km kabelů. V některých regionech je rozkládání kabelů problematické kvůli terénu, životnímu prostředí, zákázaným zónám a bariérám jako jsou dálnice a řeky. V některých regionech navíc žije zvěř, která kabely překousává. Zde jsou opravy kabelů na dením pořádku. Použití kabelů je také velmi náročné pro pracovníky, ty často nesou zatěž až

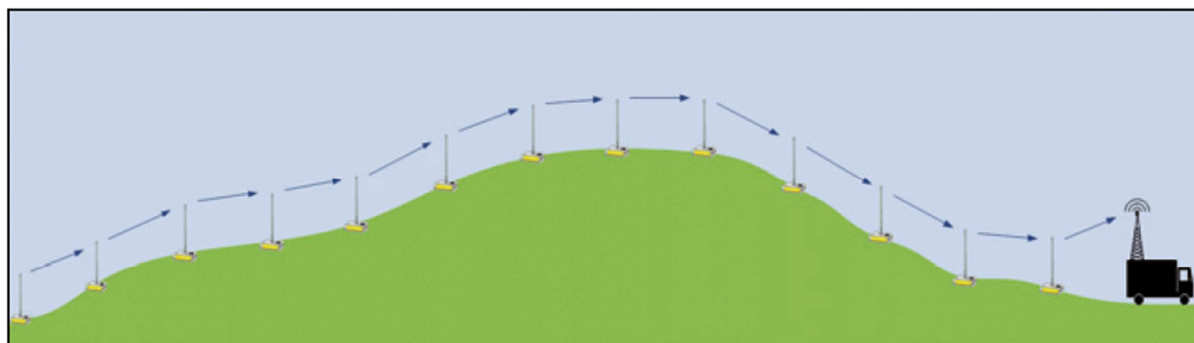
20 kg kabelů a musí chodit chodit po nerovném terénu. Z toho také plynou zdravotní rizika. Kvůli těmto problémům chtějí geofyzici už dlouho nahradit kabely něčím jiným. V posledních letech bylo zaznamenáno několik úspěchů a pokroků v oblasti využívání bezdrátových sítí. Kvalita dat z těchto systémů je excelentní a jednotlivé jednotky jsou velmi spolehlivé, ale každý bezdrátový systém obecně vyžaduje kompromisy.

Největším problémem je zajištění kvality dat. To nemá nic společného s kvalitou elektroniky, ale s výbavou se může stát cokoliv když je ponechána na zemi bez hlídání. Mohou nastat problémy s prostředím ve kterém se přístroje nachází, rušivý může být například vítr nebo šum pocházející z civilizace. V případě autonomních uzlů (slepých systémů) nejsou data k dispozici ještě dny až týdny po tom co jsou naměřena. Z přístrojů je nejprve potřeba data stáhnout a pak přeformátovat v počítači určenému ke zpracování dat. Některé bezdrátové systémy umí sbírat data přiblížením přístroje poblíž jednotky, tím se spustí bezdrátové stahování dat. Tato metoda se nazývá „drive-by“ sbírání dat. Použití této metody je obrovský krok kupředu obzvlášť když je kombinována s použitím polních počítačů které sbírají data z celých uzlů. Přesto pozorovatelé a zástupci klientů chtějí vidět data v reálném čase tak, jak jsou zvyklí u kabelového systému.

Tento bezdrátový seismický systém předávající data v reálném čase a přesto čítající tisíce kanálů potřebných pro moderní 3D seismický průzkum se dlouho nedařilo sestavit. Samozřejmě první volba k předávání dat byla použití rádia k předávání dat z geofonů do centrálního střediska. Problém rádia je ten, že tisíce geofonů potřebují tisíce rádií, ale tolik rádiových kanálů není k dispozici ani kdyby se využily placené frekvence. Mnoho měření je prováděno v členitém terénu, takže ani přenos dat mezi dvěma zařízeními v dohledu, ani použití vysokých rádiových frekvencí není možné. Dalším problémem v tomto případě je použití baterií, takto by každá stanice potřebovala baterii velikosti automobilové. Tímto systém ztrácí chtěnou přenosnost.

Řešením této situace je využití metody nazývané „bucket brigade“, kde se každá sběrná jednotka stává zároveň rádiovým relé. Každá jednotka obsahuje malý vysílač a přijímač o frekvenci 2,4 GHz, který komunikuje se sousedními jednotkami na obou stranách. Rádio zde představuje uzavřený okruh operující pouze na jediném kanálu. Jelikož každé rádio je použito ke komunikaci pouze jedné skupiny, je schopno fungovat při velmi malé spotřebě. To znamená, že každá jednotka dokáže fungovat dostatečně dlouho za použití malé lithiové baterie. Tisíce jednotek v průzkumu se tímto mohou vyhnout vzájemnému rušení díky omezené přenosové vzdálenosti. Jelikož je vzdálenost rozmístění malá, jednotky jsou vzájemně v dohledu i v nepravidelném terénu, například při měření v kopcích jak je ilustrováno na obr. 5. V případech, kdy je v cestě geografická překážka, jednotky mohou být

nakonfigurovány jako radiové relé k přenosu signálu přes překážky. Získávání a posílání dat je kontinuální proces při kterém polovina jednotek vysílá a druhá polovina přijímá v jakýkoliv časový okamžik.



Obr. 5. Komunikační cesta pro přenos dat za využití metody bucket brigade. (Převzato z Crice, 2014).

Konfigurace systému je podobná klasickému rozložení při použití kabelů. Jednotlivé řady jednotek jsou připojeny k centrální páteřní řadě. Malé řady shromažďují a předávají data směrem k páteřní lince z obou stran této linky na frekvenci 2,4 GHz. Propojovací jednotka linky (dále jen LIU) získá data z těchto dvou menších linek a připojí se na 5,8 GHz rádio na malé věži. Každý pár linek je připojen k jedné LIU, která pak odesílá získaná data. Jelikož LIU jsou obvykle rozmístěné ve větších vzdálenostech než normální jednotky, musí být rádio schopné vysílat na větší vzdálenost a při vyšších frekvencích, aby byla zaručeno zaslání dat z celé řady stanic. Z toho plyne větší spotřeba a tím pádem i potřeba větších baterií, kterých ale není potřeba velké množství. Jednotlivé LIU je také možné propojit optickým kabelem, když to situace vyžaduje.

Nahrávací vozidlo pro bezdrátové systémy je velice podobné tomu pro kabelové systémy. Najdeme zde několik obrazovek ukazujících stav měřících jednotek zahrnujících testy geofonů, baterií a funkčnosti, monitor zobrazující šum v reálném čase, reprezentativní mapu průzkumu a data. Data jsou uložena na pevných discích a mohou být nahrána také na přenosná média.

Tato metoda byla využita v létě roku 2013 v Iráku v oblasti zvané Kurdistan. Na měření bylo použito 7 500 kanálů registrujících v reálném čase. Přes extrémní podmínky zahrnující teploty nad 50°C, povětrnostní vlivy, ale také velmi hornaté území se metoda projevila jako velmi spolehlivá a schopná plnohodnotného měření.



### 4.3. Využití technologie iDAS

Optické kabely byly zavedeny jako prostředek pro přenos velkého objemu dat, přičemž v porovnání s metalickými vodiči je jejich výhodou možnost přenosu na velkou vzdálenost s minimální možností porušení dat během přenosu. Časem se ukázalo, že některé podmínky okolí ovlivňují šíření světla optickým vláknem – příkladem může být teplota. Tohoto jevu lze využít k měření teploty podél celého průběhu optického kabelu. Toho využívá tzv. distribuovaný teplotní senzor (Distributed temperature sensor, DTS, Dankin et al., 1985). V geofyzice se tento systém využívá k teplotním měřením a monitorování teploty například v geotermálních vrtech (Tyler et al., 2009). Jiným parametrem, který může ovlivnit šíření světla optickým kabelem, je hydrostatický tlak působící na kabel.

V této práci se budu zabývat novým typem distribuovaného měřicího systému, který se označuje jako inteligentní distribuovaný seismický senzor (intelligent distributed acoustic sensor, dále jen iDAS). Pojednávat o této nové technologii budu na základě článku Parker et al. (2014). Tento systém je schopen měřit deformaci ve všech bodech optického kabelu (Farhadiroushan et al., 2009) a může být využit jako nástroj pro seismická měření.

iDAS představuje nový nástroj pro seismický průzkum díky možnosti současného měření tisíců kanálů za použití obyčejného optického kabelu jako snímače a zároveň bez nutnosti paralelního pokrytí. Jednoduchost této metody nám dovoluje provést měření bez nutnosti zásahu do vrtu nebo produkčního profilu. Měření funguje na principu optické time domain reflektometry (TDR). Série pulzů je vyslána do optického kabelu a zaznamenává se čas návratu rozptýleného světla. Díky zaznamenávání času jsme schopni určit polohu bodu, ve kterém se světlo odrazí. Tímto způsobem je možné získat informaci o velikosti mechanického napětí podél celého kabelu. Z opakovaných měření lze pak zjišťovat i časové změny tohoto napětí, tedy měřit dynamiku pole napětí v okolí kabelu. Vzhledem k rychlosti opakování vlastního měření tak lze sledovat změny napětí, odpovídající šíření seismických vln o akustických frekvencích. Naměřená data jsou stejně kvalitní jako ta z bodových snímačů. Dokonce i citlivost systému se dá ovlivnit za použití digitálního zpracování signálu a kombinování seismické odezvy.

Technicky nejnáročnější aspekt je schopnost věrně zaznamenávat seismický signál a ne jen jeho aproximaci. Jak uvádějí Parker et al. (2014) na příkladu signálu o frekvenci 300 Hz bylo demonstrováno, že iDAS zaznamenává signály o akustických frekvencích bez zkreslení.

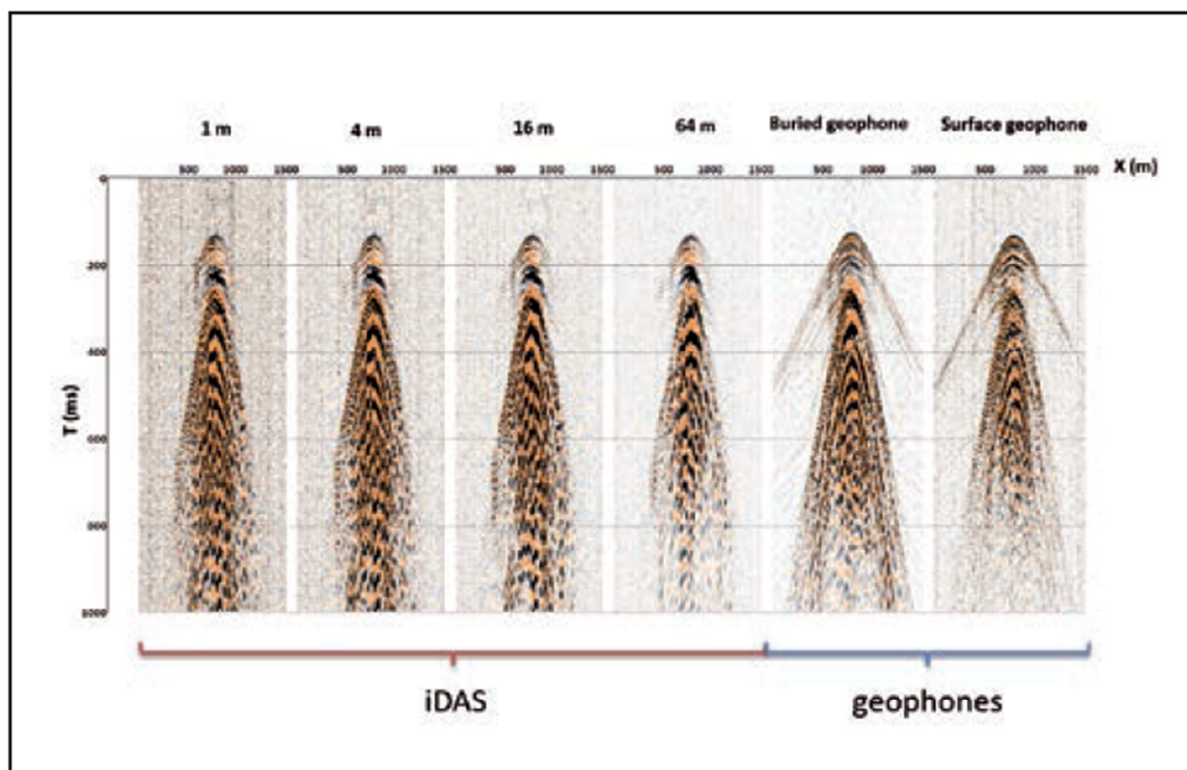
Co se vzorkovací frekvence této technologie týče, ta je závislá především na době potřebné k průchodu jednoho pulzu skrz celou délku kabelu a zpátky. Nemělo by se stát, že se v kabelu budou vyskytovat dva pulzy stejné vlnové délky v jeden čas. Rychlost světla ve skle je přibližně  $200\,000\,000\text{ ms}^{-1}$ , tudíž vzorkovací frekvence vychází například pro 10 km kabel 10 kHz, pro 1 km kabel 100 kHz atd. V případě nutnosti je možné navýšit vzorkovací frekvenci použitím více pulzů generovaných různými lasery s různou vlnovou délkou.

Šířka pásma systému iDAS je limitována především rychlostí přenosu seismického signálu od zdroje do snímacího přístroje. Nejnižší naměřená frekvence za použití systému iDAS byla 8 mHz, to představuje periodu přes 2 minuty. Naopak nejvyšší naměřená frekvence byla 49,5 kHz pro kabel délky 1 km. Nepředpokládá se, že by horní hranice frekvence mohla být limitována něčím jiným než Nyquistovou frekvencí a použitou vzorkovací frekvencí.

Důležitým faktorem při měření je prostorová rozlišovací schopnost systému. Ta závisí na době trvání optického pulzu využívaného k měření. Například při délce pulsu 10 ns lze uvažovat o tom, že jedna měřená hodnota odpovídá průměrným vlastnostem na délce 1 m kabelu. iDAS je schopen dosáhnout prostorového rozlišení od 1 m do 10 m, se vzorkováním podél kabelu s krokem 25 cm. Čím vyšší chceme rozlišení při měření, tím více nám stoupá poměr šumu k signálu. Krom toho je také zapotřebí vysokorychlostní elektroniky kvůli které pak stoupá komplexnost celého systému.

Co se týká maximální vzdálenosti měření, ta je závislá především na optických ztrátách v kabelu a na počtu měřicích bodů. iDAS využívá optimální vlnovou délku světla, a to kolem 1550 nm, díky ní je systém schopný dosáhnout délky až 40 km. Při použití optického zesilovače bylo dosaženo délky 80 km s minimální degradací signálu. Díky tomu je možné využít iDAS pro obrovský průzkum na zemském povrchu. V současnosti je využíván hardware schopný zaznamenávat a zpracovávat data až z 40 000 bodů současně, což by například při délce 40 km umožňovalo vzorkování po 1 m.

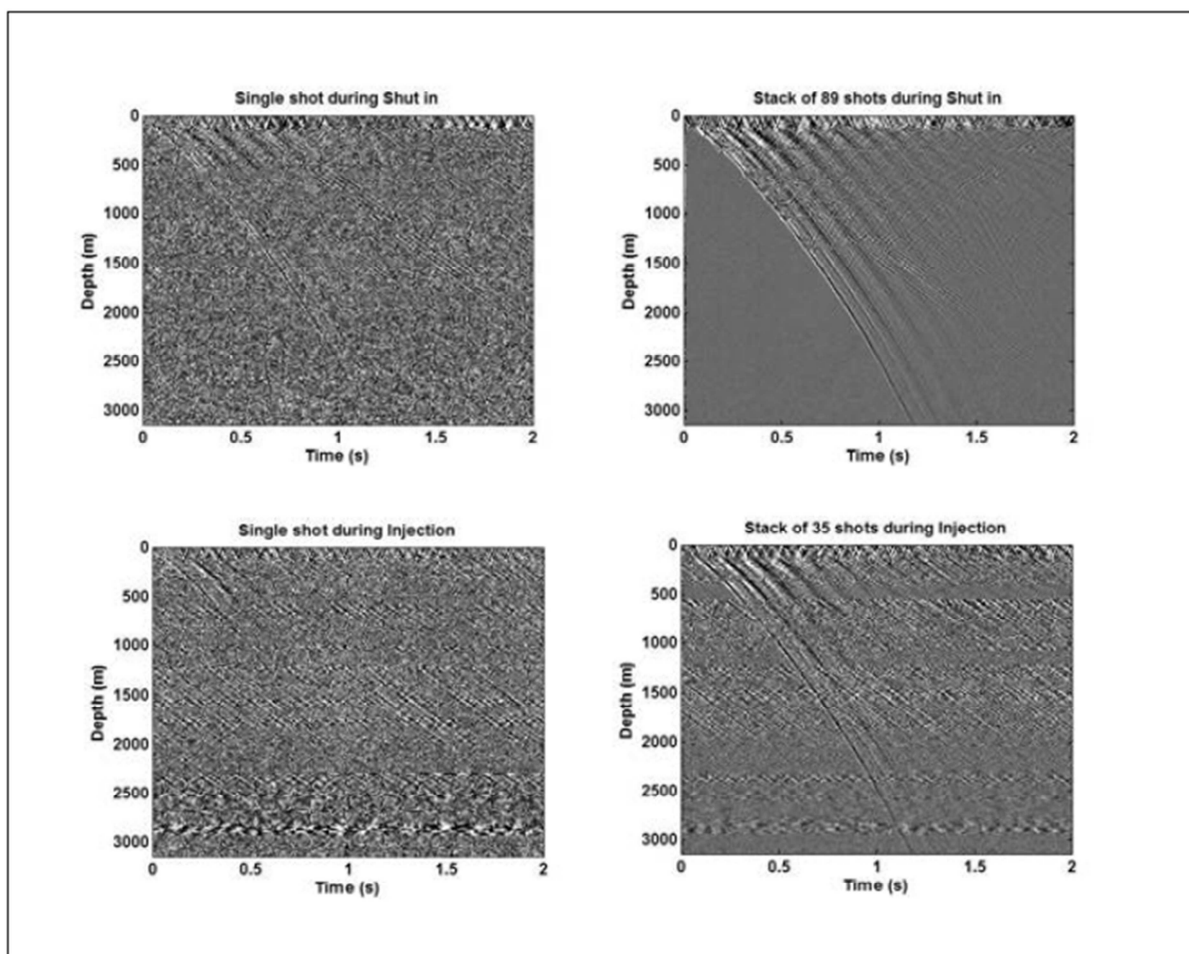
Jak jsem zmiňoval dříve, iDAS je možné použít i pro průzkum na zemském povrchu. To na příkladu uvádí Daley et al. (2013). V tomto případě byl kabel zakopán v příkopě hlubokém 0,8 m a jako zdroj byl použit pád závaží o hmotnosti 720 kg. Na obr. 7 je porovnání naměřených dat technologií iDAS a klasickým použitím geofonů. Z experimentu vyplývá konkurenceschopnost technologie iDAS.



Obr. 7. iDAS data s různým prostorovým průměrováním v porovnání se zakopaným geofonem a geofonem položeným na povrchu. (Převzato z Parker et al., 2014).

Kromě toho se v publikaci Parker et al. (2014) také zabývali použitím technologie iDAS pro měření metodou vertikálního seismického profilování. Zabývali se vlivem sčítáním dat opakovaných měření v injekčním vrtu s proudící vodou. Z měření vyšlo najevo, že sčítání zlepšuje poměr signálu k šumu jak je vidět na obr. 8. Z toho také vyplývá nižší šum a jasnější obraz seismických reflexů v případě přerušení injektáže vody do vrtu.

iDAS představuje novou metodu pro seismický průzkum ve vysokém rozlišení. Ta může být využita na povrchu, na mořském dně a pro měření ve vrtu. Použití ve vrtu představuje mnoho výhod například profilování proudění a monitorování stavu rezervoáru. To vše při využití stejného kabelu.



Obr. 8. Na obrázku jsou data z proudícího a zavřeného injektážního vrtu v pobřežních vodách. Data vykazují zlepšení v poměru signálu k šumu s opakováním měření. (Převzato z Parker et al., 2014).

## 5. SESMIKA MOŘSKÉHO DNA

Seismické měření na mořském dně (Ocean bottom seismic, dále jen OBS) může být aplikováno pro různé typy průzkumů. Nejčastěji se využívá k doplnění informací o rezervoáru při uhlovodíkovém průzkumu. Přemístěním senzorů z hladiny na mořské dno a tím pádem i oddělením zdroje od snímače lze získat několik výhod oproti měření při použití za lodí tahaných streamerů (Maver, 2011). OBS se stále více stává strategickou technologií při uhlovodíkovém průzkumu (Davies et al., 2011).

Jak ve svém článku uvádí Maver (2011), OBS využívá seismické senzory na dně, propojené ocelovými kabely, které jsou rozmístěny jako více krátkých (6-12 km dlouhých) kabelů, nebo méně delších kabelů (dlouhých až 72 km). Většina těchto systémů vyžaduje nahrávací loď přímo propojenou s kabely. To rapidně navyšuje počet potřebných lodí k průzkumu. Různé typy systémů mohou být

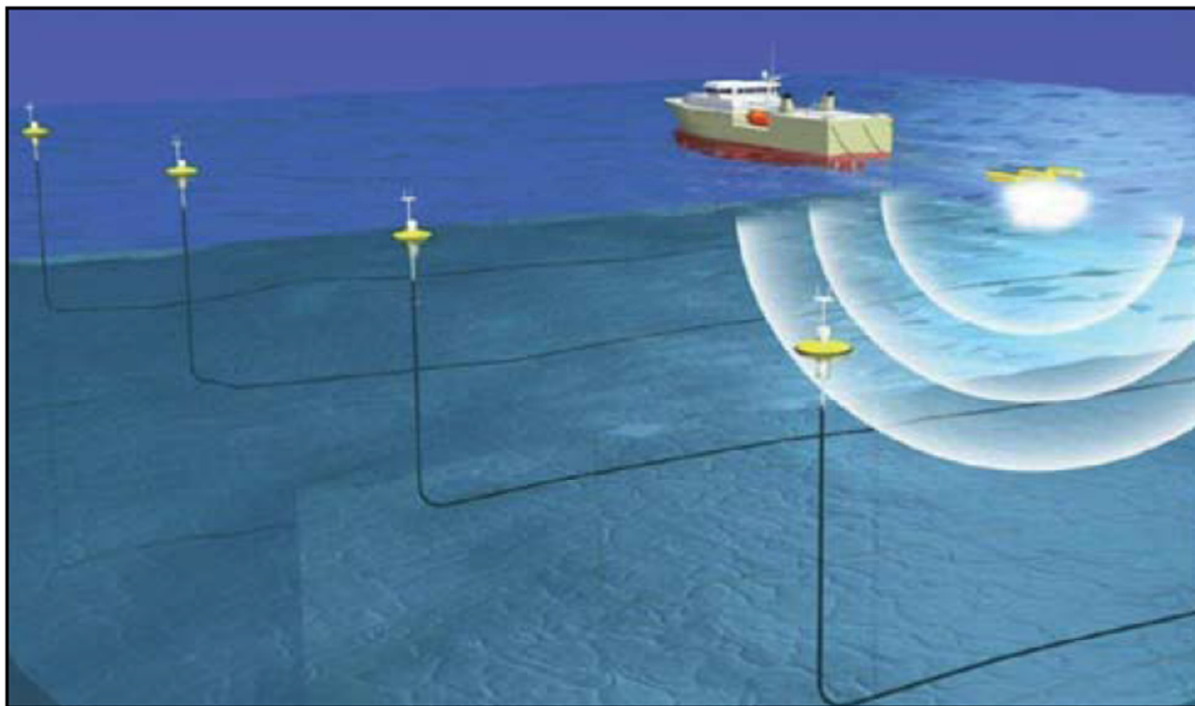
použity v hloubkách od 10 m do 1000 m. Systémy pro hlubší průzkum jsou zatím ve vývoji a počítají s hloubkou až 2000 m.

Jak již bylo řečeno, OBS využívá individuální seismické senzory a autonomní nahrávací jednotky umístěné na mořském dně. Každý uzel má své nahrávací zařízení a baterii. Životnost baterie určuje jak dlouho může být systém rozmístěn na mořském dně před nutným vytáhnutím. S pokroky v životnosti baterií se stává tento problém méně důležitým. Problematikou umisťování systému a popisem použitých senzorů se zabývá Maver (2011). Do 1000 m mohou být uzly spouštěny na vysokopevnostním ocelovém laně. To představuje efektivní a levný způsob. V hlubokých vodách bývají uzly rozmístovány v poměrně širokých intervalech, typicky 400 m × 400 m v mřížce, za použití dálkově ovládaného robota. Tato technika byla pro komerciální účely použita v limitovaném počtu případů pro průzkum hlubokých vod a průzkum v špatně přístupném terénu.

Nejdůležitějším důvodem využívání OBS je opakovatelnost měření pro 4D průzkum. Při měření pomocí tažených streamerů nikdy nedostaneme tak kvalitní porovnatelná data, jako při využití OBS. Podle Mavera (2011) je chyba při opakovaném umístění snímačů pomocí ocelových a kevlarových lan méně než 10m a je ještě menší při rozmístění pomocí robota.

Velký pokrok v této oblasti přinesla technologie VectorSeis Ocean, která se využívá převážně pro trvale rozmístěné 4D čtyřkomponentové monitorovací systémy. Ta je založena na použití téměř stejných nástrojů, které jsou k vidění u OBS, nebo při měření na povrchu.

Hlavní rozdíl této metody oproti ostatním metodám zmiňuje ve svém článku Maver (2011) a to, že metoda VectorSeis Ocean nahrává všechna data do autonomních bójí jak vidíme na obr. 6. Díky tomu je možné získat data a napájet systém i bez vytažení kabelů. 4D průzkum je tak mnohem přesnější.



Obr. 6. Autonomní OBC systém (VectorSeis Ocean) využívající kabely připojené k bójím pro zásobování elektrickým proudem a nahrávání dat. (Převzato z Maver, 2011).

Technologie OBS nám poskytuje výhodu oproti využívání streamerů v použití senzorů skládajících se z více komponentů. Ty mohou být dvoukomponentové nebo čtyřkomponentové, skládající se buď z hydrofonu a jednoho geofonu, nebo z hydrofonu a tří ortogonálních geofonů umístěných na mořském dně. Jak bylo zmíněno dříve, hydrofony detekují změnu tlaku. To je ale skalární veličina a tím pádem nemá žádný směr. To může být problém při identifikaci vln pocházejících ze seismického zdroje a odražených vln. Z tohoto důvodu jsou vedle hydrofonů použity také geofony k určení rychlosti a zrychlení. To už jsou vektorové veličiny, takže známe směr průchodu vlny. Na základě obrácené polarizace při průchodu odražené vlny a vlny od seismického zdroje lze většinou určit o kterou vlnu se jedná.

## 6. DISKUSE A ZHODNOCENÍ

Ropný průmysl a jeho rozvoj je závislý na cenách ropy. Z toho vyplývá také závislost výzkumu a vývoje nových metod průzkumu a těžby na aktuálních cenách ropy. Nicméně i výzkum a vývoj zpětně působí na cenu ropy. Jako příklad může posloužit zavedení technologie těžby plynu z břidlic, které vedlo k celosvětovému poklesu cen zemního plynu. Podobně jako zavedení této technologie může i rozvoj metodiky průzkumných metod vést k rozšíření objemu známých zásob a tím pádem k dočasněmu nižšímu zájmu o geofyzikální průzkum. I přes tyto potíže a jistou cykličnost je vývoj seismických metod, používaných pro průzkum na ropu a plyn, nezadržitelný a směřuje ke stálému zdokonalování známých technologií a zavádění zcela nových, originálních přístupů. S největší pravděpodobností bude tento trend pokračovat i v budoucnu, protože klesající zásoby uhlovodíků povedou ke zvýšení ekonomického zájmu na rozvoji nových geofyzikálních metod i nových metod těžby. Příkladem můžou být ropné šoky, kdy poptávka po ropě převýšila nabídku. S rostoucí cenou ropy se také může vyplatit začít těžit již nalezená ložiska, která byla doposud ekonomicky nevýhodná pro těžbu. Nové průzkumné metody bude nutné hledat proto, aby bylo možné hledat i rozsahem a objemem malá ložiska nebo zásoby, které dnes nalézt nedovedeme.

Problematiku hledání ložisek uhlovodíků a jejich dobývání představují strategické technologie, které poskytují majitelům, kteří tyto technologie mají, velmi významnou výhodu. Proto lze očekávat, že určitá část moderních průzkumných metod a těžebních technologií je utajována jejich vlastníky, a proto nemusí být informace o nich veřejně přístupné a publikované. Ve své práci jsem se soustředil na několik technologických a metodických inovací, které byly publikovány v odborné literatuře. I když jsou popsány principy těchto metod a technologií, zdaleka to nemusí znamenat, že by bylo jednoduché zavést je do praxe. Přesto považuji za důležité sledovat rozvoj a pokrok těchto metod, protože v budoucnu se jejich využití nepochybně rozšíří a stanou se běžně používanými technologiemi při geofyzikálním průzkumu.

## **7. ZÁVĚR**

V práci jsem se obecně zabýval seismickým průzkumem a dále velmi stručně vývojem a historií seismologie. Podrobněji jsem rozebral umělé zdroje seismické energie, konkrétně technologii Vibroseis a její přínos pro reflexní seismiku. Dále jsem stručně popsal systémy pro registraci seismických vln včetně nových technologií bezdrátového sběru seismických dat za použití geofonů a také využitím optických kabelů jako snímačů. Nakonec se věnuji seismickému průzkumu mořského dna a novinkám v této disciplíně. Jak z mé práce vyplývá, uhlovodíkový průmysl se snaží stále přesněji identifikovat nová ložiska a maximálně využít ta stará. Díky obrovskému množství peněz plynoucímu z těžby a zpracování uhlovodíků se investoři snaží vkládat prostředky na zdokonalování starých metod průzkumu a vyvíjení nových metod, které by jim dopomohly k tomuto černému zlatu.



## 8. POUŽITÁ LITERATURA

(2009): *Bible: překlad 21. století*, Vyd. 1. Praha: Biblion, 1564, [10] s. ISBN 978-80-87282-00-7.

(2000): *Seeing into the earth: noninvasive characterization of the shallow subsurface for enviromental and engineering applications*. Washington, D.C.: National Aacademy Press, c2000, xvii, 129 s.

Bagaini, C., Bunting, T., El-Emam, A., Strobbia, A. L. C.(2010): Land Seismic Techniques for High-Quality Data, *Oilfield Review*, Volume 22, No. 2, 28-39 s.

Beaten, G., Fokkema, J., Ziolkowski, A.(1988): The marine vibrator source, *First Break*, Volume 6, No. 9, 285-294 s.

Ben-Menahem, A.(1995): A concise history of mainstream seismology: Origins, legacy, and perspectives, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Volume 85, No. 4, 1202-1225 s.

Ben-Menahem, A., Singh, S.J.(1981): *Seismic Waves and Sources*, New York, NY: Springer New York, 1108 s. ISBN 9781461258568.

Cline, B.F.(2007): The History of Kerosene, *History Magazine*, August/ September 2007, 1 s.  
Dostupné z : <http://www.bevcline.com/kerosene.pdf>, 29.07.2015

Crice, D.(2014): A cable-free land seismic system that acquires data in real time, *First Break*, volume 32, No. 1, 97-100 s.

Dakin, J.P.(1985): Distributed optical fibre raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector, *Electronic letters*, Volume 21, No. 13, 569-570 s.

Daley, T.M, Freifeld, B.M., Ajo-Franklin, J., Dou, S., Pevzner, R., Shulakova, V., Kashikar, S., Miller, D.E., Goetz, J., Henninges, J., Lueth, S.(2013): Field testing of fiber optic distributed acoustic sensing (DAS) for subsurface seismic monitoring, *Leading Edge*, Volume 32, No. 6, 936-942 s.

Davies, D., Mannaerts, H., McGarrity, J., Ibram, M., McKenzie, C., Campbell, S., Alexander, G., Lozano, A., Kommedal, J., Barkved, O. and Van Gestel, J-P.(2011): High-density OBC – a step

change in reservoir imaging – BP North Sea view, *Offshore Europe*, Aberdeen, UK. SPE-146144-MS, 11 s. ISBN 978-1-61399-138-1.

Fair, D., Miller, J.(1973): *Seismic vibrator system*, United States Patent, US3777843 A, 11.12.1973

Farhadiroushan, M., Parker, T.R., Shatalin, S.(2009): *Method and Apparatus for Optical Sensing*, WO2010136810 A2, 27.05.2009

Hall, M.(2009): Analysis of field tests with an improved hydraulic vibrator. *79<sup>th</sup> SEG International Annual Meeting, Expanded Abstracts*, 4 s.

Hemberger, J.M.(1997): Black Gold at Blood Farm: the Industrial Archaeology of a mid- 19th Century Oil Field, Venango County, Pennsylvania, *Ohio Valley Historical Archaeology* Volume 12, 16 s.

Karus, J.V.(1957): Nové metody užité geofysiky, *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, Volume 2, No. 2, 219-223 s.

Kearey, P., Brooks, M., Hill, I.(2002): *An introduction to geophysical exploration*, 3rd ed. Malden, MA: Blackwell Science, viii, 262 s. ISBN 0632049294.

Kvasnička, M.(1997): 4000 let seismologie (Hledání kořenů jedné vědecké disciplíny, *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, Volume 42, No. 6, 324-331 s.

Lowrie, W.(2007): *Fundamentals of Geophysics. 2nd ed.*, Cambridge University Press, 381 s. ISBN 978-0-521-67596-3.

Maugeri, L.(2006): *The age of oil: the mythology, history, and future of the world's most controversial resource*, Westport: Praeger, xx, 340 s. ISBN 0-275-99008-7.

Maver, K.G.(2011): Ocean bottom seismic: strategic technology for the oil industry, *First Break* volume 29, No. 12, 75-80 s.

Parker, T., Shatalin, S., Farhadiroushan, M.(2014): Distributed Acoustic Sensing – a new tool for seismic applications, *First Break*, volume 32, No. 2, 61-69 s.

Shearer, P.M.(2009): *Introduction to seismology*, 2nd ed. New York [N.Y.]: Cambridge University Press, xiv, 396 s. ISBN 9780521708425.

Sheriff, R.E.(2002): *Encyclopedic Dictionary of Applied Geophysics*. Fourth ed., SEG, 450 s. ISBN 1-56080-118-2

Telford, W.L., Geldart, L.P., Sheriff, R.E.(1990): *Applied geophysics*, 2nd ed., New York: Cambridge University Press, xx 770 s., ISBN 0521326931.

Tyler, S.W., Selker, J.S., Hausner, M.B., Hatch, C.E., Torgersen, T., Thodal, C.E., Schladow, S.G.(2009): *Enviromental temperature sensing using Raman spectra DTS fiber-optic methods*, Water Resources Research, Volume 45, No. 4, 11 s.

Wei, Z., Phillips, T.F.(2012): Improving S/N ratio on vibroseis source signature at low frequencies, *82<sup>nd</sup> SEG International Annual Meeting, Expanded Abstracts*, 5 s.

Zhouhong, W., Yuanzhou, P.(2015): Vibroseis source improvements towards broadband land acquisition, *First Break*, Volume 33, 61-65 s.